

CELLA ULTRASONORA DI GRANDE AREA PER LA MODULAZIONE DELLA LUCE (*)

(Con sei figure)

AMEDEO GIACOMINI

SUMMARY. — Cella ultrasonora describitur, qua luminosi fascis, magnam habens sectionem, modulatio fieri potest. Huius cellae proprias curvas, experimentis ductas, Auctor exhibet, et praeterea, quod ad simpliciores quosdam casus attinet, introductam linearem distortionem computat.

INTRODUZIONE

L'uso di un reticolo ultrasonoro, costituito da onde *progressive*, per la modulazione della luce a frequenza notevolmente inferiore alla frequenza degli ultrasuoni è stato proposto da P. BIQUARD⁽¹⁾.

Si deve invece a CH. BACHEM⁽²⁾ la prima osservazione riguardante la possibilità di modulare ad alta frequenza un fascio luminoso mediante onde ultrasonore *stazionarie*.

I due tipi di modulazione hanno avuto sinora scarse applicazioni, essendosi queste limitate alla televisione ed alla fluorometria⁽³⁾. Per di

(*) Nota presentata dall'Accademico Pontificio Francesco Giordani il 12 agosto 1944.

(1) BIQUARD P., *Nouveaux moyens de commande d'un flux lumineux et applications*. « Brev. Fr. », n. 752.910 (1932).

(2) BACHEM CH., *Über die Kompressibilität elektrolytischer Lösungen*. « Z. Phys. », 101, 541, (1936).

(3) Vedasi, ad esempio: BERGMANN L., *Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*. VDI Verlag, Berlin, 1942; HIEDEMANN E., *Grundlagen und Ergebnisse der Ultraschallforschung*. W. De Gruyter, Berlin, 1939.

più la letteratura scientifica non fornisce in modo esauriente⁽¹⁾ gli elementi quantitativi atti a caratterizzare le nuove cellule (caratteristiche, curve di risposta, distorsioni, ecc.).

Tali ragioni ci hanno indotto ad uno studio sistematico sul comportamento delle cellule ultrasonore.

Durante il corso delle ricerche si è in particolare progettato un nuovo tipo di cellula, che consente di modulare agevolmente fasci luminosi di grande sezione.

In questa nota si descrive la nuova cellula, illustrandone le caratteristiche.

SCOPO E DESCRIZIONE DELLA NUOVA CELLULA

Per modulare la luce con i reticoli ultrasonori si usa generalmente la disposizione sperimentale illustrata in figura 1. Il condensatore L_1 proietta l'immagine della sorgente luminosa S sopra il diaframma forato K_1 fornendo una sorgente secondaria puntiforme; la lente L_2 invia un fascio parallelo attraverso la cella modulatrice, mentre la lente L_3 provvede alla formazione delle pseudo immagini di diffrazione sullo schermo K_2 ; quest'ultimo trattiene il flusso che compete agli ordini superiori lasciando passare quello relativo all'ordine zero (o viceversa).

Se, come supponiamo, la modulazione deve essere fatta a frequenza acustica, (o comunque a frequenza inferiore a quella degli ultrasuoni) si modula a tale frequenza la tensione applicata al quarzo. La parete della cella che è di fronte a quest'ultimo viene rivestita di materiale assorbente gli ultrasuoni affinché le onde siano puramente progressive.

Quando si desidera proiettare a distanza la luce modulata si fa uso di una lente come la L_4 di figura 1.

Allo scopo di semplificare la disposizione ora descritta si possono eliminare la lente L_4 ed il diaframma K_1 , sostituendo a quest'ultimo una sorgente di natura puntiforme.

Altra semplificazione più sostanziale consiste nell'eseguire la proiezione a distanza mediante una sola lente (la L_2 di fig. 1), affidando

(1) Le notizie più diffuse sull'argomento si trovano nell'articolo: LEE H. W., *Some Factors involved in the optical design of a modern television receiver using moving scanners*. Proc. IRE, 27, 496 (1939).

alla pupilla di ingresso del sistema ottico che riceve il fascio il compito di isolare dagli altri il fascio di ordine zero. Basta all'uopo dare al reticolo ultrasonoro un « passo » convenientemente piccolo, vale a dire usare ultrasuoni di frequenza sufficientemente alta.

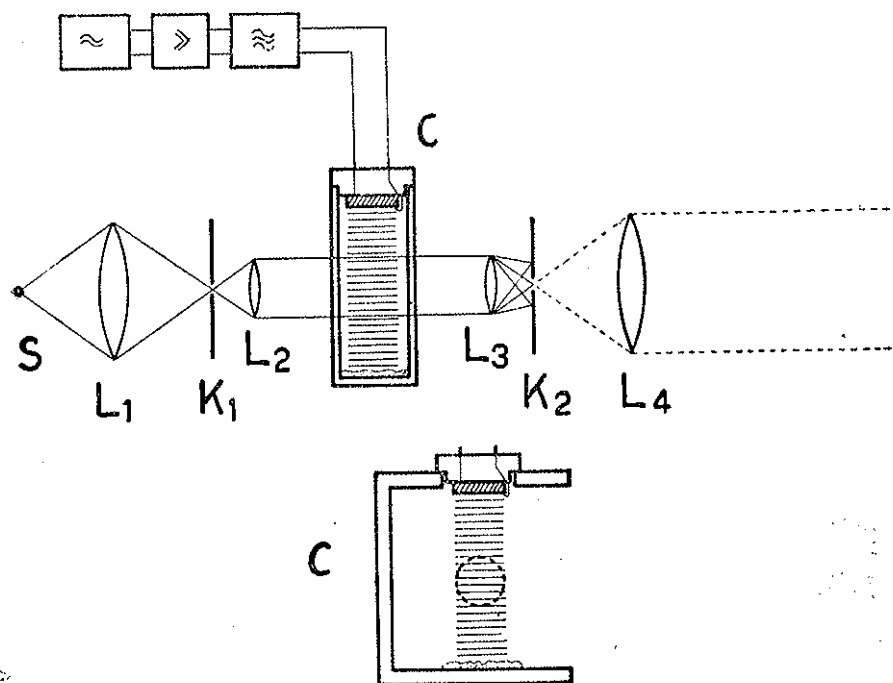


FIG. 1.

Disposizione sperimentale atta alla modulazione della luce.
Q, quarzo generatore di ultrasuoni; C, sezione del fascio luminoso.

Sorge però una difficoltà d'ordine generale: il diametro della lente proiettante non può superare qualche centimetro, perchè la luce deve necessariamente attraversare il fascio ultrasonoro, la cui sezione è vincolata alle dimensioni della piastrina di quarzo. Ciò ha per conseguenza che la trasmissione a distanza viene eseguita in condizioni sfavorevoli, essendo notoriamente l'illuminamento prodotto da un proiettore funzione della sua apertura assoluta e non di quella relativa.

È quindi indispensabile poter aumentare il diametro del fascio che attraversa la cella modulatrice.

La difficoltà segnalata presenta qualche analogia con quella incontrata quando si desidera ottenere un fascio luminoso, di grande sezione, polarizzato linearmente e si dispone solamente di un piccolo Nicol. Come è noto, la invenzione dei dischi noti sotto il nome di Polaroid ha fornita la soluzione più elegante.

Abbiamo quindi pensato di costruire una cella ultrasonora avente area notevolmente superiore a quella che i comuni cristalli di quarzo usuali permettono di raggiungere.

La nuova cellula è fondata sull'uso di un mosaico « lineare » costituito da piastrine rettangolari, aventi lunghezza grande rispetto alla larghezza, disposte in fila secondo la dimensione maggiore.

La figura 2 mostra una attuazione sperimentale della cellula; l'asticciuola di materiale isolante che è al centro sostiene tre o più piastrine di quarzo; ciascuna di esse ha le dimensioni $1 \times 3 \times 0,058$ cm³.

Nella figura 3 si vedono invece i fasci ultrasonori emessi dalle tre piastrine: l'irraggiamento è bilaterale, le onde ultrasonore sono progressive e non modulate (frequenza 5 MHz).

Poichè la nuova cella non impone in generale alcuna limitazione al diametro del fascio luminoso che la attraversa (basta infatti aumentare convenientemente il numero delle piastrine componenti il mosaico) è possibile attuare senz'altro le auspiccate semplificazioni dei sistemi ottici giungendo alla disposizione illustrata in figura 4a. Essa contiene unicamente il proiettore S-L e la cella modulatrice C. La fig. 4b indica schematicamente una sezione della cella normale al percorso del fascio luminoso (quest'ultimo è rappresentato dal circolo tratteggiato).

Con facili calcoli, ed accettando talune consuete ipotesi semplificative, abbiamo appurato che gli elementi quantitativi atti a definire il nuovo sistema di trasmissione a distanza del fascio modulato sono forniti dalle relazioni seguenti:

$$[1] \quad D = \frac{d}{F} q$$

$$[2] \quad E = \frac{\frac{h^2}{4} \varepsilon}{q^2}$$

$$[3] \quad s = \frac{\lambda F f}{u d} \gg 1$$

Cella ultrasonora di grande area per la modulazione della luce.

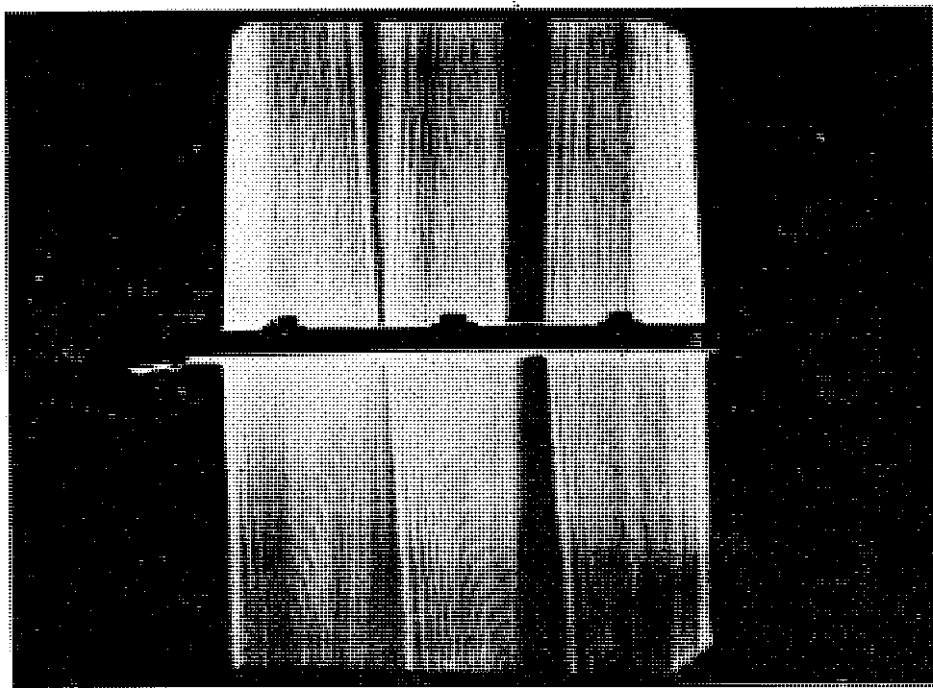


Fig. 3.

Fasci ultrasuoni emessi dalle tre piastine della cella modulatrice

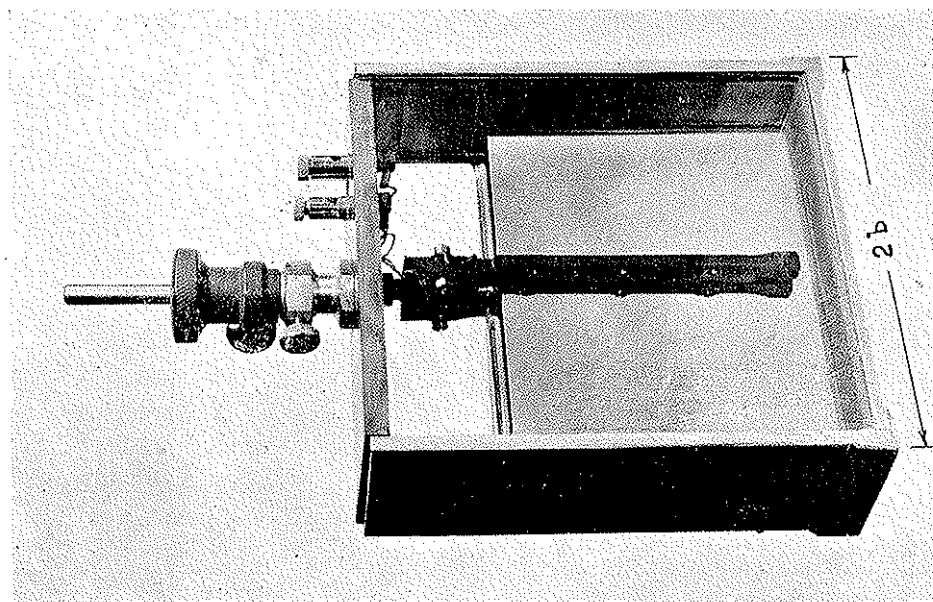


Fig. 2.

Fotografia della cella modulatrice

ove sono: d il diametro della sorgente luminosa, supposta dischiiforme; F la distanza focale del proiettore; q la distanza alla quale viene proiettato il fascio; D il diametro del fascio luminoso alla distanza q

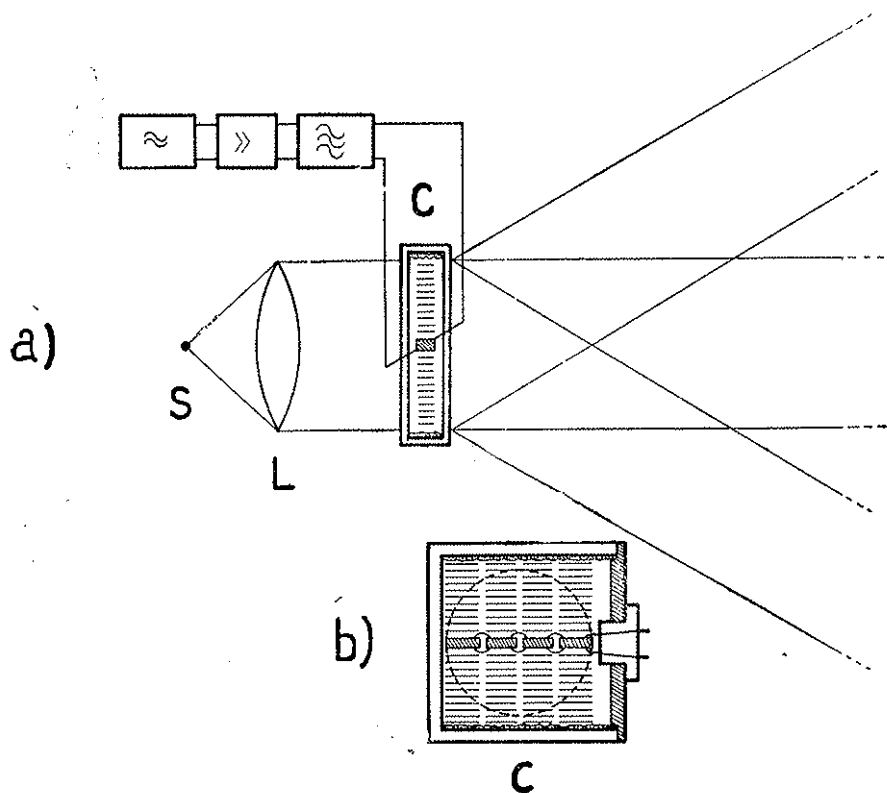


FIG. 4.

- a) Disposizione sperimentale per la proiezione a distanza della luce modulata mediante la nuova cella C.
 b) Sezione della cella modulatrice; sono visibili i fasci ultrasonori emessi da quattro piastrelle e il contorno del fascio luminoso.

(diametro dell'immagine della sorgente); ϵ lo splendore della sorgente; h il diametro della lente proiettante; E la densità del flusso di energia raggianti alla distanza q ; λ la lunghezza d'onda della luce usata; f la frequenza degli ultrasuoni; u la velocità di propagazione di questi ultimi nel liquido che riempie la cellula; l la distanza che separa i centri delle pseudo immagini di diffrazione; s il rapporto $l:D$. (Tutte le grandezze misurate in unità CGS o tutte in unità MKS).

La [1] serve al calcolo del diametro che il fascio avrà nella zona da illuminare, e palesemente si può accrescerlo influenzando così sulla distanza focale F come sul diametro d della sorgente.

La [2] precisa quanto è stato già detto sulla utilità di aumentare il diametro h della lente proiettante. Essa pone altresì in evidenza la nota indipendenza di E dalla distanza focale F , ciò che permette di scegliere quest'ultima in modo da soddisfare alla condizione $s \geq 1$ che esprime quantitativamente la necessità di separare convenientemente le pseudo-immagini di diffrazione.

Le tre relazioni permettono ovviamente di calcolare il proiettore appena assegnate sette delle dieci grandezze che in esse compaiono.

CARATTERISTICHE ELETTRO-OTTICHE DELLA CELLA

È possibile eseguire la modulazione della luce a frequenza acustica utilizzando l'effetto LUCAS e Biquard, perchè il flusso luminoso Φ_0 , che non viene convogliato nei fasci diffratti, è funzione della intensità J_u degli ultrasuoni, e quindi della tensione ad alta frequenza V_q applicata al quarzo generatore.

La teoria di C. V. RAMAN e N. S. NAGENDRA NATH⁽¹⁾, convalidata dalle misure di F. H. SANDERS⁽²⁾, permette a rigore di calcolare il legame esistente fra Φ_0 e J_u ; senonchè la teoria è valida per luci monocromatiche. Si è quindi senz'altro ricavata sperimentalmente una caratteristica del tipo $\Phi_0 = f(V_q)$. Anzichè riportare in ordinate i flussi luminosi, o, più propriamente, i flussi di energia raggiante, si è preferito riferirsi alle correnti erogate dalla cella fotoelettrica ricevente (I_0 corrente in assenza di ultrasuoni, I_u corrente per la tensione al quarzo V_q). Infatti una misura fotometrica avrebbe avuto scarso interesse; nelle applicazioni è la corrente fornita dalla fotocella che si utilizza, ed essa dipende in modo assai complesso dal flusso di energia raggiante, perchè la composizione spettrale di questo muta al variare della intensità degli ultrasuoni.

⁽¹⁾ RAMAN C. V., NAGENDRA NATH N. S., *The diffraction of light by high frequency sound waves*. « Proc. Indian Acad. Sc. », 2, 406-412 (1935); 2, 413 (1935); 3, 75 (1936); 3, 119 (1936).

⁽²⁾ SANDERS F. H., *Intensity measurements in the diffraction of light by ultrasonic waves*. « Canad. J. Res. », 14, 158 (1936).

La figura 5 mostra la caratteristica, essa è ottenuta con radiazioni infrarosse provenienti da una sorgente a incandescenza munita di filtro Schott R. G. — 10 — (2 mm.).

Da un esame anche sommario della curva di figura 5, risulta chiaramente che è possibile raggiungere elevate percentuali di modulazione (80 %-90 %) con bassa distorsione di seconda specie. Quest'ultima può essere dedotta agevolmente caso per caso. Maggiore interesse presenta invece il calcolo della distorsione di prima specie.

Tale distorsione non proviene, come nei trasduttori elettroacustici, dalla esistenza di modi normali di vibrazione, aventi frequenza vicina a quella di vibrazione forzata: infatti la piastrina di quarzo oscilla a frequenza enormemente alta rispetto a quella di modulazione, e ciò spiega come nelle poche pubblicazioni sinora apparse sull'argomento non venga fatto cenno delle distorsioni lineari. Quando però la cella ha grande area, interviene la seguente causa di distorsione. Essendo la velocità di propagazione degli ultrasuoni nei liquidi dell'ordine del km. sec.⁻¹, se la frequenza di modulazione è sufficientemente elevata, il fascio luminoso che attraversa la cella illumina contemporaneamente regioni del liquido, ove gli ultrasuoni hanno diversa ampiezza. Il fenomeno è analogo a quello che si verifica nella « lettura » delle colonne sonore cinematografiche, quando la fenditura esploratrice ha larghezza non trascurabile rispetto al « passo » della incisione.

Un calcolo relativamente semplice, che ripete sostanzialmente quello fatto per le colonne sonore ⁽¹⁾ e che non si ritiene necessario trascrivere in esteso, porta alla conclusione seguente: la ampiezza ψ_v di fluttuazione del flusso luminoso, modulato a frequenza v , dipende dal rapporto fra le dimensioni della cellula, nella direzione secondo cui muovono gli ultrasuoni e la frequenza v secondo la

$$\frac{\psi_v}{\psi_0} = \frac{\sin \pi \frac{bv}{u}}{\pi \frac{bv}{u}}$$

⁽¹⁾ Vedasi ad esempio: LICHTE H., NARATH A., *Physik und Technik des Tonfilms*. S. Hirzel, Leipzig (1941).

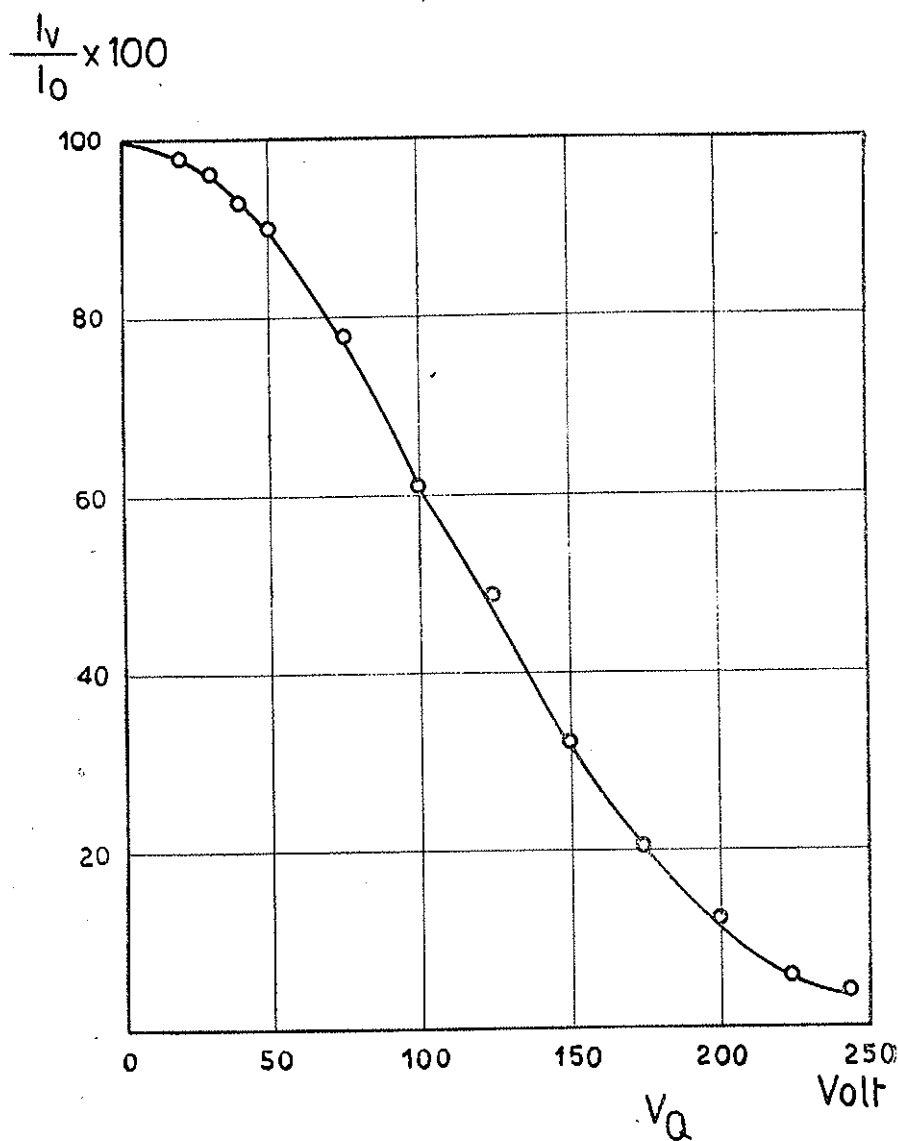


FIG. 5.

Caratteristica della cella modulatrice. In ascisse la tensione applicata ai quarzi, in ordinate la corrente che percorre la cella fotoelettrica ricevente il fascio luminoso (riferita alla corrente di riposo).

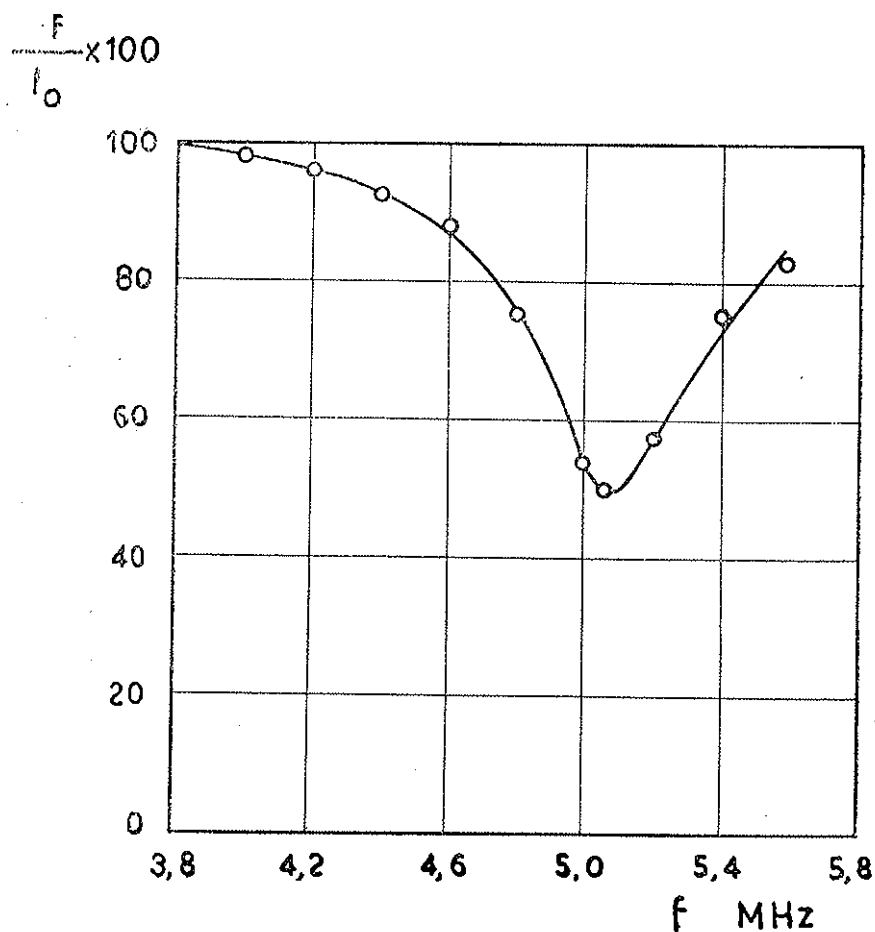


FIG. 6.

Caratteristica di frequenza della cella. In ascisse la frequenza della tensione applicata ai quarzi, in ordinate la corrente che percorre la fotocella ricevente il fascio luminoso, riferita alla corrente di riposo (frequenza tendente a zero). Gli ultrasuoni non sono modulati.

dove si è indicato con ψ_0 la ampiezza di fluttuazione del flusso luminoso per $v \rightarrow 0$, e con $2b$ la larghezza della cella supposta di sezione rettangolare (e investita da un fascio anch'esso di sezione rettangolare) ed avente l'asta che sostiene i quarzi situata al centro (vedi fig. 2).

Alcuni valori numerici valgono a fissare gli ordini di grandezza delle distorsioni lineari.

Se la frequenza di modulazione massima è di 5000 Hz, e si desidera che a tale frequenza la perdita di livello non superi 2 dB, in valore assoluto, la larghezza massima consentita per la cella è di 20 cm. (liquido della cella xilolo); se la frequenza massima da trasmettere è di 10.000 Hz occorre, a pari distorsione, che la larghezza non superi 10 cm., mentre se è consentita una perdita di -5 dB si possono dare alla cella rispettivamente 30 cm. e 15 cm. di larghezza.

Onde trarre elementi di giudizio per eventuali altre applicazioni, è stata ricavata la caratteristica che dà il flusso luminoso non diffratto (ordine zero) in funzione della frequenza della tensione applicata alle piastrine di quarzo. Come si vede in figura 6 è possibile alterare di qualche unità per cento la frequenza senza modificare in maniera sensibile la « risposta della cellula ».

Con riferimento alla potenza di alimentazione della cella, si osserva che essa è proporzionale al diametro del fascio modulato, ma è indipendente dalla densità del flusso luminoso convogliato. A fissare gli ordini di grandezza valgono i seguenti dati numerici: la potenza elettrica ad alta frequenza, occorrente per la cella illustrata in figura 2, munita di quattro quarzi, (diametro del fascio luminoso 12 cm.), è di 2 watt.

Qualora si voglia utilizzare la cella per modulare ad alta frequenza il fascio luminoso occorre disporre di fronte alle piastrine di quarzo riflettori che determinino la formazione di onde stazionarie. Ovviamente tali riflettori devono essere a distanza regolabile, se la frequenza usata è costante; mentre possono essere fissi se si può variare la frequenza di quanto occorre affinché la distanza quarzo-riflettore contenga un numero intero di semilunghezze d'onda.

In entrambi i casi si constata tuttavia che il progressivo riscaldamento del liquido, e la conseguente variazione di velocità degli

ultrasuoni, rende necessaria una continua regolazione della distanza del riflettore o della frequenza ultrasonora. Per evitare tale inconveniente basta adoperare il liquido a velocità indipendente dalla temperatura indicata dallo scrivente in una precedente pubblicazione ⁽¹⁾.

L'Autore esprime la sua gratitudine al dott. A. BARONE per la collaborazione da lui prestata durante il progetto della cella sopra descritta.

⁽¹⁾ GIACOMINI A., *Liquido nel quale la velocità degli ultrasuoni è indipendente dalla temperatura*. Pont. Ac. Sc. «Acta», 6, 87 (1941).